

基于水波原理的城市道路交通事故影响分析

何雅琴, 容煜伦, 柳祖鹏

(武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 城市道路交通事故影响已有研究成果主要针对交通事故影响范围和持续时间, 且研究方法为基于流体力学的交通流理论。该理论假设交通流处于密闭空间, 而城市道路网络出入口、节点甚多, 假设与实际情况不符。城市道路交通事故对交通的影响效果与涟漪现象一致, 因此采用水波原理定量分析城市道路交通事故对交通的影响程度。首先将城市交通事故对交通的影响与水面受到干扰的涟漪现象进行对比分析。在此基础上, 提出交通影响系数概念, 利用调研所得车速数据绘制交通影响系数特征曲线; 利用 SPSS 软件, 借助水波波动方程, 构建交通影响系数随时间的关系模型。结果表明, 模型拟合度较好, 具有统计学意义。

关键词: 道路交通; 交通事故; 水波原理; 影响分析; SPSS

Traffic Impact Analysis of Urban Road Traffic Accidents Based on Water Wave Theory

He Yaqin, Rong Yulun, Liu Zupeng

(School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430081, China)

Abstract: The existing research of urban traffic accidents focuses on the impact area and duration using traffic flow theory. Such the theory is working based on general fluid mechanism which assumes a close space to road traffic. However, the hypothesis is sometimes unable to reflect the real world situation since there are typically many accesses and intersections in urban road network. Traffic influence of urban traffic accident is similar to ripple effect, so this paper tries to apply water wave theory to analyze the impact degree when encountering with traffic accidents. An analogy between traffic impact under accident and water waves ripple under interruption is unfolded. The concept of traffic impact coefficient is introduced and defined to generate a feature curve of traffic impact coefficient using investigated data. Using the software of SPSS, the paper develops a model of generating the relationship between traffic impact coefficient and time based on water wave equation. The results show that the model is statistical significance.

Keywords: road traffic; traffic accidents; water wave theory; impact analysis; SPSS

收稿日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于水波动力学的城市交通多突发事件耦合效应研究”(51408445)、湖北省高校青年教师出国留学项目(201659193)

作者简介: 何雅琴(1982—), 女, 湖北嘉鱼人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 交通应急管理。

E-mail: heyaqin@126.com

城市道路交通事故不仅带来生命和财产的损失, 也会对城市交通系统造成一定的负面影响。如果事故点产生的排队车辆不断累积、疏散不及时, 将产生扩散的连锁反应, 会导致大面积的交通拥堵甚至交通中断。因此, 对城市道路交通事故造成的影响进行分析和研究并及时采取应急对策, 具有重要的理论意义和现实价值。目前对城市道路交通事故的影响分析主要以定性为主^[1-3], 定量的

研究主要集中在事故影响范围及持续时间方面, 且研究方法主要为交通流理论^[4-13], 该理论基于流体力学理论, 假设交通流处于密闭的空间。而城市道路网络出入口、节点甚多, 假设与实际情况差别较大。本文从城市路网实际特性出发, 探讨城市道路交通事故的影响, 为突发事件交通影响研究提供新思路。

1 城市道路交通事故影响定性分析

1.1 影响形式

1) 点的影响。

当路段上发生交通事故,事故点路段通行能力下降,瓶颈点形成,事故段交通开始出现混乱。此时若上游到达交通量小于事故

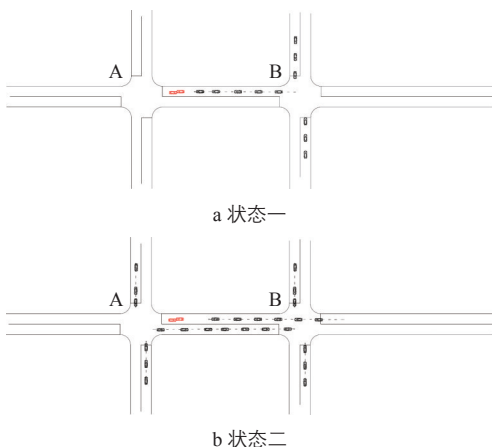


图1 事故发生在有中间分隔带路段的交通影响辐射
Fig.1 Traffic impact radiation of accidents occurring on a roadway segment with median separator

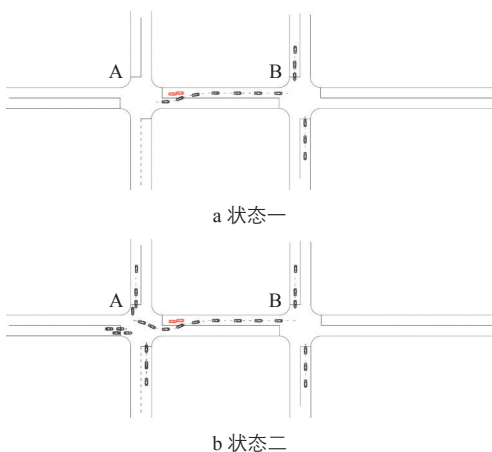


图2 事故发生在无中间分隔带路段的交通影响辐射
Fig.2 Traffic impact radiation of accidents occurring on a roadway segment without median separator

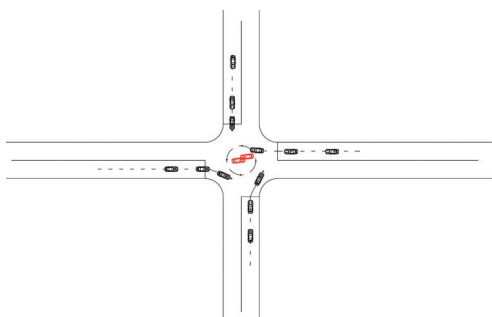


图3 事故发生在交叉口的交通影响辐射
Fig.3 Traffic impact radiation of accidents occurring within an intersection area

后路段剩余通行能力,则不会引发交通拥堵排队,车辆会以较低的速度通过事故点。整个事故过程只对事故点的交通产生一定影响。

2) 线的影响。

当路段上发生交通事故,上游到达交通量大于事故后路段剩余通行能力,引发交通拥堵排队。随着拥堵的持续,排队长度逐渐延伸,整个路段处于拥堵状态,车流密度增大到极限。但是排队尚未延伸到上游交叉口或者垂直交叉道路的交通量很小,暂时不会形成排队,事故只对其发生路段交通产生影响。

3) 面的影响。

当道路交通事故发生后,排队延续到上游交叉口,交叉口通行能力迅速下降,拥堵在上游交叉口开始向各个方向扩散,造成更大范围的交通拥堵,甚至使整个交通网络陷入瘫痪状态。

1.2 不同事故位置的影响范围

1) 有中间分隔带的路段。

路段上发生如图1所示的交通事故,会产生以下交通状态:①各车辆按规则有序行驶(见图1a),由于交通事故使事故点通行能力明显降低,形成一个虚拟瓶颈,事故后方到达车辆会减速或依次排队等待,拥堵向上游蔓延,直至延伸到上游交叉口,上游交叉口各进口道停车线后面的车辆也会受虚拟瓶颈影响,并使拥堵向四周扩散;②车辆无序行驶(见图1b),事故后方到达车辆依次减速或排队,并向上游蔓延伸展,上游交叉口B各方向车辆强行驶入交叉口抢行,导致交叉口内车辆行驶混乱,使事故点对向车流在该交叉口受阻,进而影响交叉口A的车辆正常行驶,以至影响周边路网的交通运行。

2) 无中间分隔带的路段。

路段上发生如图2所示的交通事故,同样会产生如下的交通状态:①不影响对向车辆正常行驶时借用对向机动车道(见图2a),由于事故后方车辆行驶轨迹发生变化,造成车辆减速,导致后方车辆排队,并向上游蔓延;②无序状态下占用对向车道(见图2b),使对向车流形成一个虚拟瓶颈,通行能力下降,造成对向车辆减速或排队,并向事故下游方向蔓延,事故对上下游方向的交通均产生影响,随着持续时间的推移,车辆排队会向四周蔓延,以至影响整个周边路网;③后续车辆按规则有序排队等候,交通运行情况与事故发生在有中间分隔带的路段的状态一

相同。

3) 交叉口内部。

如图3所示,当事故发生在交叉口内部,导致该交叉口的通行能力明显降低,形成交通瓶颈,进入交叉口各方向车辆会绕行驶事故点,形成一个临时环岛交通,从而导致车速降低形成拥堵,并沿路段向四周蔓延,进而影响周边路网的交通运行。

4) 小结。

交通事故发生后无论是车辆有序行驶还是无序行驶,对交通影响的最终状态均是以事故点为中心向四周逐渐扩散的圆,辐射的范围和速度与突发事件的严重程度相关,且影响程度随着与事发点距离的增大而逐渐减小。这与向水里扔石头产生的涟漪现象一致,石头扔进水里会引发以石头为圆心的水波,并以同心圆的形式向外传播,传播速度和传播范围与波源(石头)的强度有关,并且振动强度随着距离的增大逐渐衰减直至消失。如果交通系统中交通条件、道路条件均相同,事故对交通的影响将是均匀地向四周辐射,与水波现象一致。但是由于交通系统的不确定性,其道路条件和交通条件不可能完全一样,事故对交通的影响可以看成是交通波非均匀地向四周扩散。因此,可以尝试借助于水波原理分析突发事件对交通的影响。

2 城市道路交通事故交通影响定量分析

2.1 交通影响系数

将城市道路交通事故的影响程度用定量指标交通影响系数表示,定义为事发时受影响路网内道路某一断面、某一点的平均车速与事发前该点平均车速的比值,用 α 表示。

如图4所示, O 点表示事件发生地点,事件发生后 t 时刻半径为 r 、极角为 θ 的断面 A 上交通影响系数

$$\alpha_{r,\theta}(t) = \frac{v_{r,\theta}(t)}{v'_{r,\theta}}, \alpha_{r,\theta}(t) \in [0, 1], \quad (1)$$

式中: r 为事件影响范围半径/m, $r \in [0, R]$; t 为事件的影响时间/min, $t \in [0, T]$; $v_{r,\theta}(t)$ 为事件发生后 t 时刻距事发地半径为 r 、极角为 θ 的断面的平均车速/(km·h⁻¹); $v'_{r,\theta}$ 为事件发生前距事发地半径为 r 、极角为 θ 的断面的平均车速/(km·h⁻¹)。 α 越大,交通影响程度越小, α 越小,交通影响程度越大。 $\alpha_{r,\theta}(t)=0$ 表示影响达到极值,道路成阻塞状态; $\alpha_{r,\theta}(t)=1$ 表示突发事件对交通没有影响

或影响已经恢复。

2.2 交通影响系数特征分析

基于从交管部门调研获得的交通事故和道路行车速度数据,筛选造成交通拥堵较严重的42起事故,并对每一起事故的所有影响路段车速进行整理,得到各影响路段在事故发生当天的前后各5天6:00—22:00每5 min

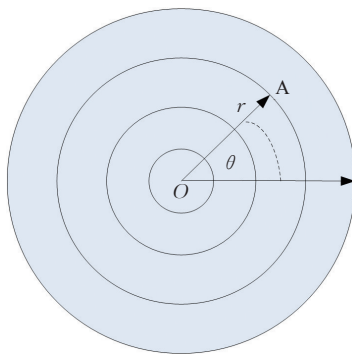


图4 基于水波原理的突发事件对交通的影响

Fig.4 Impact of road accidents based on water wave theory

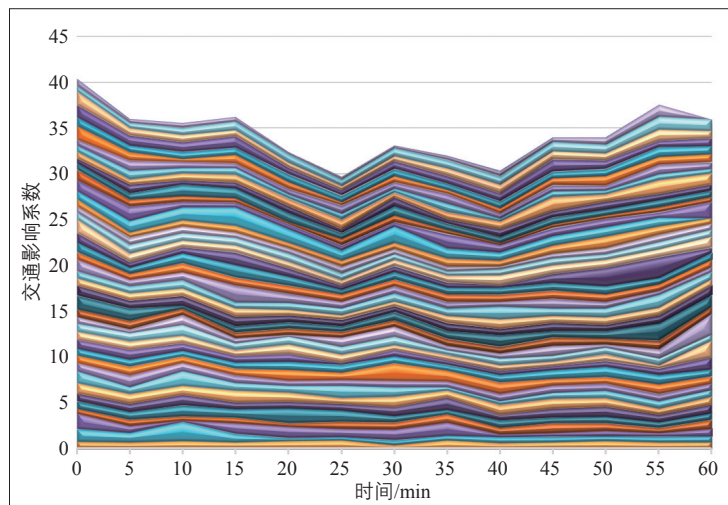


图5 交通影响系数变化趋势

Fig.5 Trends of traffic impact coefficient

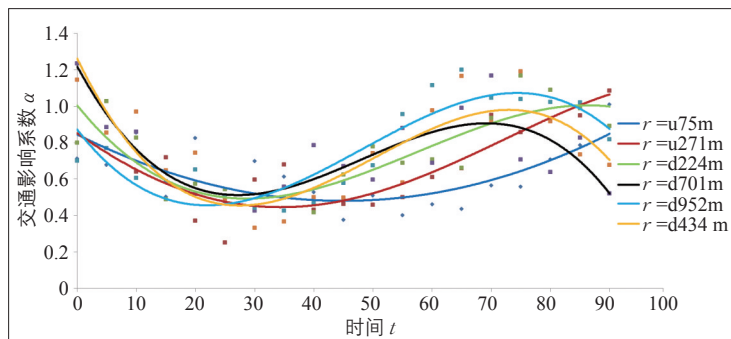
表1 不同交通事故特征

Tab.1 Characteristics of different traffic accidents

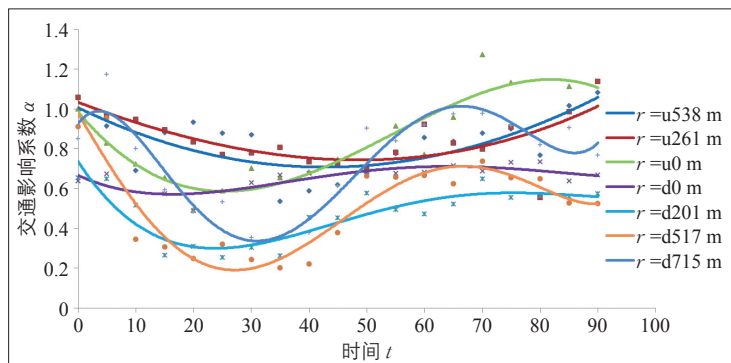
名称	事故地点	事故时间	占道情况 ¹⁾	事故类型	有无中间分隔带
事故一	解放大道—单洞路交叉口	18:38(晚高峰)	交叉口内部	刮擦	
事故二	解放大道循礼门地下通道内	7:55(早高峰)	路段(1/2)	追尾	无
事故三	新华路靠近新华路—建设大道交叉口	20:43(平峰)	路段(2/3)	刮擦	有
事故四	台北路靠近台北路—建设大道交叉口	10:53(平峰)	路段(2/2)	刮擦	无

1) 2/3指3车道路段,交通事故占用2车道。

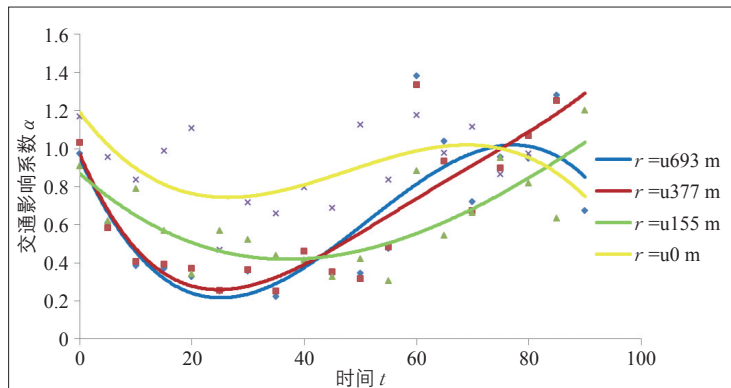
间隔的车速数据(见图5)。为了反映事发前道路的正常运行速度,取事发当日前后共10



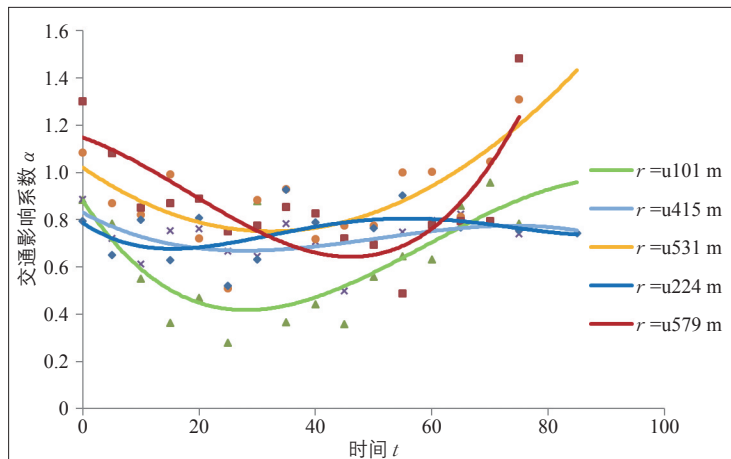
a 事故一



b 事故二



c 事故三



d 事故四

图6 事故影响点的交通影响系数

Fig.6 Traffic impact coefficient at accident impact points

天平均车速作为事发前车速,从而得到各个影响路段每5 min 间隔的交通影响系数。在实际路网条件下,不是事件影响圈上每一个点都会对应道路。另外,事件造成的影响是非均匀向外辐射的,即使同一半径的单个圆环,影响点也可以认为是离散的。因此,暂时不考虑极角和半径的影响,只考虑随时间的变化。

可以看出,各起交通事故的交通影响系数变化趋势基本一致,都是先减小至某一点,然后再逐渐增大,与事故发生后的交通运行状态吻合。事故发生后,交通运行开始受到影响,直至影响达到最大,随后由于交通疏导措施的介入,影响会逐渐减小直至消失。因此,本文用交通影响系数描述事故对交通的影响具有可行性。

选取4起代表不同特征的交通事故进行详细分析(见表1)。将每起事故各影响路段的交通影响系数随时间变化值绘制成曲线(见图6)。 r 为影响点与事故点的距离/m; u 和 d 分别为影响点位于事故点的上游或下游。

由于交通系统的不确定性及各影响点位置不同,其开始受影响和恢复交通的时间也不尽相同,各曲线轨迹之间会存在一定的差异,但是整体变化趋势基本一致。

从图6中散点及曲线特征可以看出,曲线呈波浪线型,随着时间的推移,交通影响系数先从1逐渐减小至最小值,再逐渐增大直至接近1^①,该曲线与水波波面传播曲线形状类似(见图7)。图7波形函数可表示为

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t), \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T}, \quad (3)$$

式中: η 为波高/m; H 为波幅/m; k 为 2π 时间范围内波的起伏震动次数; x 为横、纵距离/m; σ 为圆频率; t 为传播时间/s; T 为周期。

为了使公式(2)具有一般性,可以改写为三角函数

$$Y = A \cos(Wt + C) + D, \quad (4)$$

式中: A 为波高,即波峰的纵坐标值; W 为公式(2)中的 k , $W = 2\pi/T$; C 为图像沿 x 轴水平平移的距离; D 为波离开坐标轴的距离。

从图6的曲线轨迹还可以看出,与事发地点越远的影响点,其交通影响系数变化越快,事故刚发生时,距事故点远的影响点的交通影响系数会先达到最低点,随后,交通

开始恢复时，其影响系数会率先达到或接近1，意味着会比离事发地点近的影响点先恢复交通。这与实际交通运行状态一致。

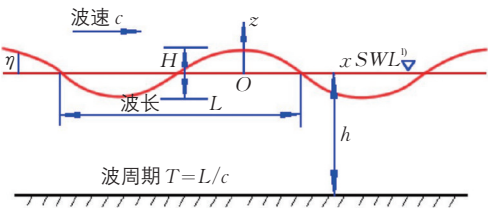
2.3 交通影响系数建模

为了验证交通影响系数随时间变化特征能否用水波方程描述，以事故一为研究对象，将对应事故发生后各个时刻(5 min间隔)的所有影响路段(也称影响点)的影响系数进行平均，得到 α 和 t 的散点图(见图8)。利用SPSS统计软件对该图像进行拟合，建立 α 与 t 的关系模型，选用类似水波方程的公式(4)进行模拟。

在SPSS中进行非线性回归时，需要手动输入自变量和因变量以及模型公式，还需要对模型中的参数进行初始值的赋予。初始值的赋予力求满足模型的特征，即减少迭代次数，让模型能够更好地满足数据要求。首先输入公式(4)，然后再逐步输入各参数初始值，结合图8，赋予 A 初始值为0.2， W 初始值为0.079(周期取80 min)， C 初始值为5.0， D 初始值为0.7，迭代结果见表2和表3，得到关系模型

$$\alpha = 0.218 \cos(0.074t + 6.882) + 0.697. \quad (5)$$

利用水波方程模拟交通影响系数随时间的关系拟合程度较好($R^2=0.948$)，具有一定的统计意义，同时也符合实际交通特性。因此，利用水波原理分析城市突发事件的交通影响具有可行性。



1) SWL 指静止水平面。

图7 水波自由面示意

Fig.7 Water wave surface

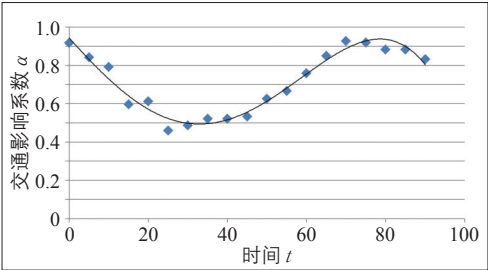


图8 平均交通影响系数特征

Fig.8 Characteristics of average traffic impact coefficient

2.4 仿真分析

2.4.1 仿真场景

假设某个有中间分隔带的双向10车道路段上发生一起两车刮擦事故，占用2个车道，事故延迟时间为20 min。对该事故进行VISSIM仿真，采用信号控制模拟交通事故的发生，总周期为4 200 s，共设置三组，以便体现事故车辆占用的道路长度：0~1 200 s为绿灯，表示事故发生前的时间；1 200~2 400 s为红灯，代表事故时间；2 400~4 200 s为绿灯，表示事故结束。仿真运行示例见图9。在事

表2 实际事故数据迭代历史记录

Tab.2 Iteration historic records of real accidents

迭代 编号	残差平 方和	参数			
		A	W	C	D
1.0	0.853	0.200	0.079	5.000	0.700
1.1	0.593	-0.028	0.079	6.077	0.691
2.0	0.593	-0.028	0.079	6.07	0.691
2.1	1.152	0.177	0.066	3.013	0.687
2.2	0.477	0.149	0.073	5.632	0.691
3.0	0.477	0.149	0.073	5.632	0.691
3.1	0.233	0.073	0.080	6.478	0.690
4.0	0.233	0.073	0.080	6.478	0.690
4.1	0.050	0.210	0.074	7.133	0.692
5.0	0.050	0.210	0.074	7.133	0.692
5.1	0.025	0.213	0.075	6.853	0.697
6.0	0.025	0.213	0.075	6.853	0.697
6.1	0.024	0.218	0.074	6.886	0.697
7.0	0.024	0.218	0.074	6.886	0.697
7.1	0.024	0.218	0.074	6.882	0.697
8.0	0.024	0.218	0.074	6.882	0.697
8.1	0.024	0.218	0.074	6.882	0.697
9.0	0.024	0.218	0.074	6.882	0.697
9.1	0.024	0.218	0.074	6.882	0.697

表3 实际事故数据方差分析

Tab.3 ANOVA analysis using real accidents dataset

源	平方和	自由度	均方
回归	10.123	4	2.531
残差	0.024	15	0.002
未修正总体	10.148	19	
校正后的总变异	0.472	18	

注： $R^2=1$ -残差平方和/已更正的平方和=0.948。

故周边路段设置数据采集点,获取通过各断面的车速数据。

2.4.2 交通影响系数分析

根据仿真输出的事故前后车速值,计算

表4 交通影响系数 α 仿真结果

Tab.4 Simulation results of traffic impact coefficient α

时间 t	距事故点距离/m			平均值
	144.6	53.6	25.5	
0	0.97	0.92	0.85	0.91
5	0.94	0.84	0.65	0.81
10	0.94	0.65	0.5	0.70
15	0.73	0.4	0.35	0.49
20	0.43	0.41	0.39	0.41
25	0.4	0.41	0.38	0.40
30	0.67	0.67	0.71	0.68
35	0.84	0.76	0.78	0.79
40	0.99	0.85	0.8	0.88
45	1.01	0.91	0.81	0.91

表5 仿真事故数据迭代历史记录

Tab.5 Iteration historic records of simulated accidents

迭代编号	残差平方和	参数			
		A	W	C	D
1.0	0.689	0.200	0.100	1.000	0.500
1.1	0.970	0.031	0.226	-1.594	0.442
1.2	0.041	0.194	0.150	0.029	0.638
2.0	0.041	0.194	0.150	0.029	0.661
2.1	0.011	0.256	0.149	0.059	0.661
3.0	0.011	0.256	0.149	0.059	0.661
3.1	0.011	0.256	0.149	0.054	0.661
4.0	0.011	0.256	0.149	0.054	0.661
4.1	0.011	0.256	0.149	0.054	0.661
5.0	0.011	0.256	0.149	0.054	0.661
5.1	0.011	0.256	0.149	0.054	0.661

表6 仿真事故数据方差分析

Tab.6 ANOVA analysis using simulated accidents dataset

源	平方和	自由度	均方
回归	5.232	4	1.308
残差	0.011	6	0.002
未修正总体	5.243	10	
校正后的总变异	0.362	9	

注: $R^2=1-\text{残差平方和}/\text{已更正的平方和}=0.969$ 。

事故点周边3个断面每5 min间隔的交通影响系数(见表4)。

根据公式(5)构建的模型,利用SPSS软件对交通影响系数 α 和时间 t 进行回归分析,结果见表5、表6及公式(6)。

$$\alpha = 0.256 \cos(0.149t + 0.054) + 0.661. \quad (6)$$

利用仿真所得数据构建的交通影响系数 α 与时间 t 的关系模型,进一步证明了水波原理用于突发事件交通影响分析的可行性。

3 结论

本文首先定性分析城市道路交通事故的交通影响,并与水波现象进行对比分析;在此基础上,提出交通影响系数概念,并绘制交通影响系数随时间变化的曲线,发现该曲线与水波波面曲线形式一致,且符合实际交通运行规律。借助水波波动方程,构建交通影响系数随时间的关系模型,最后利用仿真数据对模型进行验证。结果表明,模型拟合度较好,具有统计意义。因此,用水波原理分析交通事故的交通影响,可以为突发事件交通影响研究提供一个崭新的平台和思路。

由于采集数据有限,出现了某些交通影响系数值大于1的情况,与理论值有偏差。另外,本文仅对代表不同事故场景的4起事故进行分析,无法全面反映各种类型交通事故,具有一定的局限性。交通事故影响定性分析时在建模过程中存在一些假设,并且只验证了模型的形式。因此,对于模型的精确性及实际应用还有待后续的深入研究和验证。

注释:

Notes:

- ① 曲线中部分距离事发地较远的影响点在事故开始和结束时的交通影响系数出现大于1的情况,一方面是这些影响点受影响开始时刻有延迟及提前恢复交通,另一方面车速

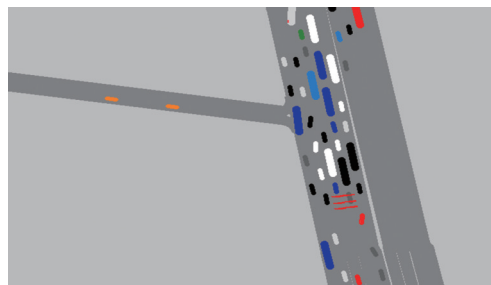


图9 仿真运行示例

Fig.9 Simulation demo example

除了受交通事故影响外还会受很多其他因素的影响,可能使事故当天某个时段(正好是事故刚发生时)的车速比平时同一时段高,从而造成实际值大于1,与理论值存在一定的偏差。

参考文献:

References:

- [1] 陈燕. 应对突发事件的城市交通应急管理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
Chen Yan. Research on Urban Traffic Emergency Management for Coping with Emergency[D]. Chengdu: Xi'nan Transportation University, 2009.
- [2] 石超峰, 徐寅峰. 突发事件对交通网络的影响评估指标和方法[J]. 运筹与管理, 2013, 22(4): 144-150.
Shi Chaofeng, Xu Yinfeng. Link Importance Identification of Transportation Networks in the Emergency[J]. Operations Research and Management Science, 2013, 22(4): 144-150.
- [3] 张臣军, 王振山, 高原. 刚蹭事故对交通运行的影响评估分析[J]. 道路与安全, 2011, 11(1): 46-50.
Zhang Chenjun, Wang Zhenshan, Gao Yuan. Analysis and Evaluation on the Traffic Operation Influence of Accident[J]. Road Traffic and Safety, 2011, 11(1): 46-50.
- [4] Baykal-Gürsoy M, Xiao W, Ozbay K. Modeling Traffic Flow Interrupted by Incidents[J]. European Journal of Operational Research, 2009(195): 127-138.
- [5] Chien S J, Goulias D G, Yahalon S, et al. Simulation-Based Estimates of Delays at Freeway Work Zones[J]. Journal of Advanced Transportation, 2002, 36(2): 131-156.
- [6] 余贵珍, 刘玉敏, 金茂菁, 等. 基于交通波的高速公路事故的交通影响分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(10): 1420-1424.
Yu Guizhen, Liu Yumin, Jin Maojing, et al. Traffic Impact Analysis of Highway Accident Based on the Shockwave Theory[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(10): 1420-1424.
- [7] 俞斌, 陆建, 陶小伢. 道路交通事故的影响范围算法[J]. 城市交通, 2008, 6(3): 82-86.
Yu Bin, Lu Jian, Tao Xiaoya. Method to Determine the Influence Area of Street Accidents[J]. Urban Transport of China, 2008, 6(3): 82-86.
- [8] 孙明玲, 杨峰, 贝登荣, 等. 基于交通波动理论的排队消散时效分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(10): 112-116.
Sun Mingling, Yang Feng, Bei Dengrong, et al. Analysis of Queue Dissipation Time Effect Based on Traffic Wave Theory[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(10): 112-116.
- [9] 马剑, 李文勇, 梁满朝. 基于卡尔曼滤波的交通突发事件影响范围预测研究[J]. 长沙大学学报, 2012, 26(5): 86-89.
Ma Jian, Li Wenyong, Liang Manchao. Prediction of Traffic Emergency Impact Scope Based on Kalman Filtering[J]. Journal of Changsha University, 2012, 26(5): 86-89.
- [10] 胡晓健, 王伟, 陆建. 道路交通意外事件影响范围确定方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 934-939.
Hu Xiaojian, Wang Wei, Lu Jian. Determination Impact Area of Traffic Incident[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(5): 934-939.
- [11] 张贵宾, 刘清, 严新平. 高速公路紧急事件延误影响分析[J]. 公路, 2008(10): 120-123.
Zhang Guibin, Liu Qing, Yan Xinping. Analysis of Impact of Expressway Emergencies on Traffic Delay[J]. Highway, 2008(10): 120-123.
- [12] 丛浩哲, 王俊骅, 童世鑫. 高速公路网络交通突发事件辐射范围预测模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 414-422.
Cong Haozhe, Wang Junye, Tong Shixin. Prediction Model of Freeway Network Traffic Incident Radiation Scope[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(3): 414-422.
- [13] 曹志远, 郭忠印, 张起森, 等. 高速公路重大交通事故时空影响范围研究[J]. 公路工程, 2011, 36(6): 55-58+73.
Cao Zhiyuan, Guo Zhongyin, Zhang Qisen, et al. Research on Time and Spatial Extent of Terrible Traffic Accident on Highway[J]. Highway Engineering, 2011, 36(6): 55-58+73.